

基于 AHP-GIS 的中宁县地质灾害易发性评价

马小波 梁新富 徐 磊 段 佳 单 斌 段志刚

宁夏回族自治区水文环境地质调查院（宁夏回族自治区水文环境地质研究所） 宁夏 银川 750021

摘 要：中宁县地质构造复杂，人类工程活动剧烈，地质灾害发育程度较高，严重威胁当地群众生命财产安全。本文基于 1:5 万地质灾害风险调查数据，依托 ArcGIS 平台，运用层次分析法（AHP）构建了栅格单元尺度的地质灾害风险评价体系。选取地质灾害发育影响因子作为评价指标，通过搭建层次结构模型、构建判断矩阵、计算权重向量并开展一致性检验，确定各项评价指标的权重。借助 ArcGIS 平台完成评价指标信息提取与叠加分析运算，并结合野外实地调查成果，对部分灾害易发性评价单元结果进行合理修正，最终编制完成中宁县地质灾害易发性分区图。本次评价成果可为中宁县地质灾害防灾减灾管理、国土空间规划及用地管控等工作提供基础支撑，也可为其他地区结合区域实际选取适宜的灾害评价方法提供参考借鉴。

关键词：地质灾害；易发性；层次分析法；地理信息系统（GIS）；中宁县

引言：地质灾害作为自然界常见的灾害形式，具有分布广、活动性强、突发性高等特征，对人类生命财产安全及经济社会可持续发展构成严重威胁。我国地质环境复杂，近年来地质灾害频发，据《中国统计年鉴 2023》数据显示，全年发生地质灾害数千起，造成重大人员伤亡与直接经济损失，凸显了开展地质灾害易发性评价的极端重要性。易发性评价旨在揭示在一定地质环境和人类工程活动背景下，地质灾害发生的可能性和难易程度，通过对灾害发生条件相似、易发程度一致的区域进行科学分区，为防灾减灾工作提供前置性指导。对于中宁县而言，深入探究其地质灾害易发性特征，不仅是保障区域社会稳定的需要，更是落实国家生态文明建设与高质量发展战略的必然要求^[1]。

随着相关技术的发展，地质灾害易发性评价方法和手段日渐丰富和完善。谢传银^[2]、陶伟等^[3]、兰盈盈等^[4]分别从作图方法、数学方法、定性与定量等不同角度，对现有评价方法进行了分类概括。从具体方法和模型来看，目前在应用层面多采用定量为主、定性为辅的方式进行某一局部区域的案例分析。其中，证据权法基于贝叶斯理论，通过计算后验概率评估灾害发生的可能性，避免了地质灾害不存在时权重偏大导致结果失真的问题，但要求所有证据因子相互独立^[5]。随机森林法在融合多源数据和非线性关系建模方面具有优势，但存在对历史灾害样本数据和专家经验辅助验证的依赖性。信息量法和逻辑回归法分别基于信息熵的量化逻辑和贝叶斯理论，具有较强的客观性。但前者存在因子选择主观性风险及其独立性假设缺陷，后者则高度依赖大样本

训练，实际应用中，也常将 2 种方法结合使用。层次分析法（AHP）和模糊综合评价法都兼容定量与定性数据，但也存在依赖专家经验，主观性较强的问题，主要适用于数据样本不足的区域。近年来，采用多模型耦合或进行不同模型对比验证的研究日益增多，验证了上述方法在地质灾害易发性评价中的可行性，以及在不同的空间尺度、生态环境、地质条件背景下的精度差异和优缺点。

中宁县地处宁夏中部，地质构造复杂，生态环境脆弱，且近年来人类工程活动频繁，其地质灾害类型可能涵盖滑坡、崩塌及泥石流等。

1 地质环境背景

中卫市中宁县（以下简称研究区）位于宁夏中部，特点是日照充足，干旱少雨，蒸发强烈，风大沙多，日温差大，冬季较长，夏季较短，春季升温较快，秋季降温迅速。降水量偏低，月际年际变化较大，大多以大雨、暴雨的形式出现，具有强度较大、历时较短且时间较集中的特点。黄河横穿中宁县北部平原地区，自中卫市沙坡头区胜金关入境，至牛首山出境。县域内地势南北两侧高、中间低，最大高差约 860m。地貌可分为山地、丘陵、台地、平原四种类型。区内地质构造相对复杂，新构造活动比较强烈，地震动峰值加速度大多未 0.20g，小部分地区为 0.15g，抗震设防烈度为 VIII 度。地质灾害比较发育的山地和丘陵区主要地层有砂岩、板岩、灰岩、泥岩、砾岩、页岩和黄土等。

2 地质灾害发育特征

根据宁夏回族自治区 2025 年度地质灾害隐患排查结果，中宁县在册地质灾害隐患点 18 处，其中崩塌 3 处、泥石流 15 处，地质灾害现象点为 109 处其中泥石流 55 处、崩塌 51 处、地面塌陷 3 处，地质灾害类型以泥石流和崩塌为主，地面塌陷较少，主要分布在红柳沟、麻黄沟、山河、凉风崖沟沟侧及县境内的采砂厂。

3 地质灾害易发性评价

评价方法为层次分析法，把影响地质灾害发育的基本要素按照关联性和隶属关系结合形成层次分析结构模型，利用 GIS 软件的分析计算功能，将评价单元数据按照权重分配结果进行信息叠加计算，按照高、中、低、非四个级别进行划分，得到中宁县地质灾害易发性评价结果。层次分析法的步骤主要分为以下四步：建立层次结构模型、构造判断矩阵、计算权向量。

3.1 层次结构模型建立

结合中宁县孕灾地质条件和地质灾害特征，选取地貌类型、工程地质岩组、地形起伏度、坡度、坡型、距水系距离、距断层距离、植被覆盖度和坡向作为评价指标（见图 1），对指标层各要素继续划分为 42 项基础指标，建立中宁县地质灾害易发性评价层次结构模型。

3.2 构造判断矩阵

判断矩阵的建立是从层次结构的第二层开始，自上而下计算某一层上各因素对上一层某个元素的相对权重，分别构造出 A-B、B-C 的判断矩阵。判断矩阵的数

值是根据地质数据资料、专家意见和分析者的认识，加以平衡后确定的。

3.3 一致性检验

通过计算各矩阵最大特征根 $\lambda_{\max}$ 及对应的特征向量 W，利用一致性指标、随机一致性指标和一致性比率进行一致性检验，各矩阵一致性比例 CR 均小于 0.10（矩阵一致性检验指标表见表 1），满足一致性检验，是合理的。

表 1 矩阵一致性检验指标表

矩阵名称	阶数 n	平均随机一致性指数 RI	最大特征根 $\lambda_{\max}$	一致性检验指标 CI
A	9	1.45	9.4500	0.0387
B1	6	1.24	6.1300	0.0204
B2	3	0.58	8.5988	0.0607
B3	3	0.58	3.0037	0.0036
B4	3	0.58	3.0142	0.0137
B5	3	0.58	3.0183	0.0176
B6	4	0.90	4.0371	0.0139
B7	4	0.90	4.0244	0.0084
B8	5	1.12	5.1342	0.0300
B9	6	1.24	6.3282	0.0521

3.4 评价指标权向量确定

通过建立层次结构模型、构造判断矩阵、计算权向量，确定了中宁县地质灾害易发性各评价指标及基础指标的权向量（地质灾害易发性评价指标权向量表见表 2）。

表 2 地质灾害易发性评价指标权向量表

指标层	权向量 W_i	指标层	权向量 W_i	指标层	权向量 W_i	基础指标层	权向量 W_i
地貌类型 B1	0.2894	低中山 C1	0.1291	坡型 B5	0.0684	凹型 C21	0.0066
		黄土丘陵 C2	0.0912			直线型 C22	0.0172
		台地 C3	0.0283			凸型 C23	0.0446
		沙漠 C4	0.0185	距水系距离 B6	0.0450	$L \leq 100M$ C24	0.0264
		冲洪积平原 C5	0.0113			$300 \leq L < 100m$ C25	0.0105
		冲积平原 C6	0.0110			$500 \leq L < 300m$ C26	0.0058
工程地质岩组 B2	0.2319	中厚层硬质砂岩、轻变质板岩岩组 C7	0.0057			$500m < L$ C27	0.0023
		薄层较软弱泥岩、页岩夹砂岩岩组 C8	0.0139	距断层距离 B7	0.0339	$L \leq 500m$ C28	0.0200
		碎屑岩岩组 C9	0.0115			$500 < L \leq 1000m$ C29	0.0080
		双层结构类土 C10	0.0242			$1000 < L \leq 2000m$ C30	0.0039
		砾质土 C11	0.0246			$2000M < L$ C31	0.0019
		砂质土 C12	0.0424	植被覆盖度 B8	0.0241	$F \leq 10\%$ C32	0.0115

续表:

指标层	权向量 W_i	指标层	权向量 W_i	指标层	权向量 W_i	基础指标层	权向量 W_i
工程地质岩组 B2	0.2319	黏性土 C13	0.0067	植被覆盖度 B8	0.0241	$30\% \leq F < 10\%$ C33	0.0069
		黄土 C14	0.1030			$50\% \leq F < 30\%$ C34	0.0033
地形起伏度 B3	0.1560	0 ~ 5mC15	0.0191			$70\% \leq F < 50\%$ C35	0.0015
		5 ~ 12m C16	0.0359			$70\% < F$ C36	0.0009
		12 ~ 122mC17	0.1011				
坡度 B4	0.1331	$i \leq 15$ C18	0.0126	坡向 B9	0.0182	平面 C37	0.0012
		$15^\circ < i \leq 25^\circ$ C19	0.0223			平面-45° C38	0.0042
		$25^\circ < i^\circ$ C20	0.0982			$45^\circ \sim 135^\circ$ C39	0.0021
/	/	/	/			$135^\circ \sim 225^\circ$ C40	0.0015
/	/	/	/			$225^\circ \sim 315^\circ$ C41	0.0028
/	/	/	/			$315^\circ \sim 360^\circ$ C42	0.0064

3.5 评价因子信息化处理

以中宁县比例尺 1:5 万的 DEM 数据为基础,将全县域分成 47183442 个 $12.5\text{m} \times 12.5\text{m}$ 的单元格,在同一栅格单元进行地质灾害评价指标提取和计算,实现归一化处理,最终形成地貌类型、工程地质岩组、地形起伏度、坡度、坡型、距水系距离、距断层距离、植被覆盖度和坡向 9 项要素的分级分区评价图。黄河水面不进行地质灾害易发性评价,作为非评价区考虑。

3.6 易发性评价

运用 GIS 平台的分析计算功能,将以上 9 项要素中评价单元信息量进行叠加计算,采用自然间断法对评价结果按照高、中、低、非四个等级进行分级,得到中宁县地质灾害易发性评价结果。根据野外调查结果,对评价结果中与现实情况不符的部分进行适当的修正,形成中宁县地质灾害易发性分区。根据形成的地质灾害易发性分区结果,将中宁县划分为中、低、非 3 个易发区,9 个易发亚区。其中中易发区分为 4 个亚区,低易发区分为 2 个亚区,非易发区分为 3 个亚区。各分区与地貌单元和地质灾害发育程度大致一致,其中地质灾害中易发区面积 1380.66km^2 , 占总面积的 40.99%; 地质灾害低易发区面积 1120.26km^2 , 占总面积的 33.26%; 地质灾害非易发区面积 831.88km^2 , 占总面积的 24.70%。

4 结语

(1) 根据中宁县孕灾地质条件和地质灾害发育特征,综合选取地貌类型、地形起伏度、坡型、坡向、坡度、工程地质岩组、距断层距离、距水系距离和植被覆盖度共 9 项要素作为评价指标,通过建立层次结构模型、构造判断矩阵、计算权向量及一致性检验,确定了地质灾害易发性各评价指标及基础指标的权向量。

(2) 利用分级分区评价图的基础上,进行信息量叠加计算,采用自然间断法按照高、中、低、非四个等级进行划分形成地质灾害易发性评价结果。根据野外调查结果,对评价结果进行可靠的修正,制作中宁县地质灾害易发性分区图。

参考文献

- [1] 许树柏. 层次分析法原理 [M]. 天津: 天津大学出版社. 1988.
- [2] 解传银. 地质灾害空间危险性评价综述 [J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8 (1): 97-102.
- [3] 陶伟, 孙岳. 基于 GIS 滑坡地质灾害易发性评价方法综述 [J]. 世界有色金属, 2020(21): 157-159.
- [4] 兰盈盈, 郭昶成, 朱云福. 地质灾害易发性评价方法综述 [J]. 地质与资源, 2024, 33(1): 65-73.
- [5] 冯振, 陈亮, 王立朝, 等. 区域地质灾害易发性评价的证据权法原理与实践 [J]. 地质通报, 2024, 43(1): 1255-1265.